

Антенны георадара.

Когда мы постигли суть георадара, Александр Щекотов сформулировал нашу общую мысль: «Георадар – это антенны.»

Принцип радиолокации основан на поиске отраженных от цели сигналов. В обычной радиолокации с зондирующим импульсом на несущей частоте – это поиск максимума огибающей. В геолокации, когда несущей нет – это поиск максимума (или минимума) полной волновой функции.

Как до нас, так и до сих пор, самой распространенной антенной георадара служит «бабочка» (рис. 1).

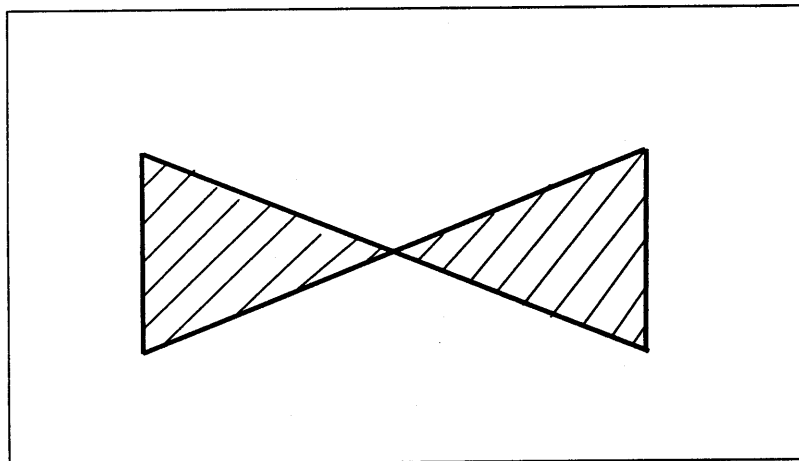


Рис. 1. Антенна «Бабочка».

На рис. 2. приведен характерный для «бабочки» излученный сигнал. В зависимости от ее формы и размеров, этот сигнал может меняться, но одно его свойство останется постоянным – он будет осциллирующим. Это означает, что, несмотря на быстрое уменьшение амплитуды, очень долго, теоретически до бесконечности, будут возникать минимумы и максимумы функции тока.

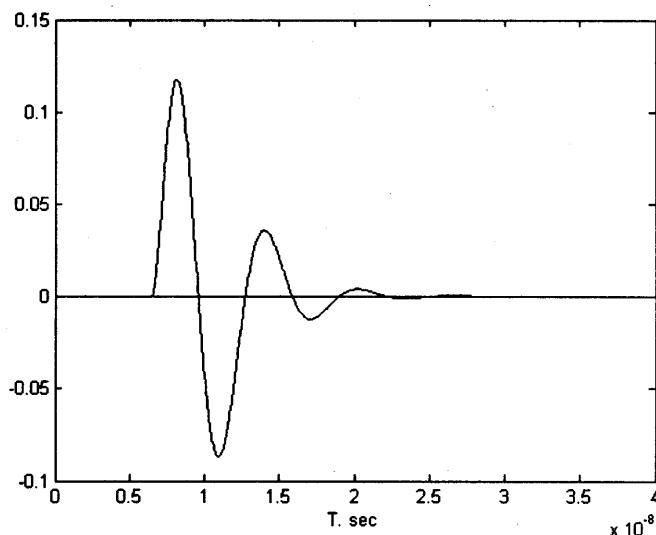


Рис. 2. Осциллирующий импульс.

Одно время на георадарных конференциях в МГУ и в научной печати стали высказывать мысль, что от мощности передатчика глубина зондирования георадара практически не зависит. Дескать, мы пробовали, но увеличение мощности передатчика увеличивает и мощность помех, поэтому соотношение сигналов не меняется, глубина зондирования остается прежней.

Что самое примечательное, с этим мнением мы можем согласиться, но только в случае, если нас обяжут использовать исключительно антенны с осциллирующей импульсной характеристикой, например, «бабочку».

С такой антенной, действительно, увеличение мощности передатчика приведет к увеличению амплитуды осцилляций, и сигналы, которые могли бы быть зафиксированы, ими подавятся. Здесь именно антенна ограничивает возможности георадара по глубине. Поскольку «бабочка» - самая распространенная антенна для георадаров, то их реальный потенциал не превышает 40 дБ, и до недавнего времени считалось, что метровая глубина зондирования может быть достигну-

та только на сухом песке или вечной мерзлоте. Считалось, что в глине георадары работать не могут.

«Физические свойства глины таковы, что в этой среде принцип геолокации не применим» - так мы прочитали в отчете наших коллег.

Один наш покупатель побывал у конкурентов и рассказал нам, как они отзываются о нашем радаре:

- «Да, у них прибор значительно мощнее, но он работает не глубже нашего.»

- «Вот видите стену, мы поставим свечку на этой стороне, а на противоположной постараемся ее увидеть. Бесполезно!»

- «Теперь вместо нашей свечки установим их прожектор. Ничего не изменится! Через стенку Вы и прожектор не увидите!»

Можно ли излучать зондирующий импульс без осцилляций? Да, и вид его показан на рис. 3.

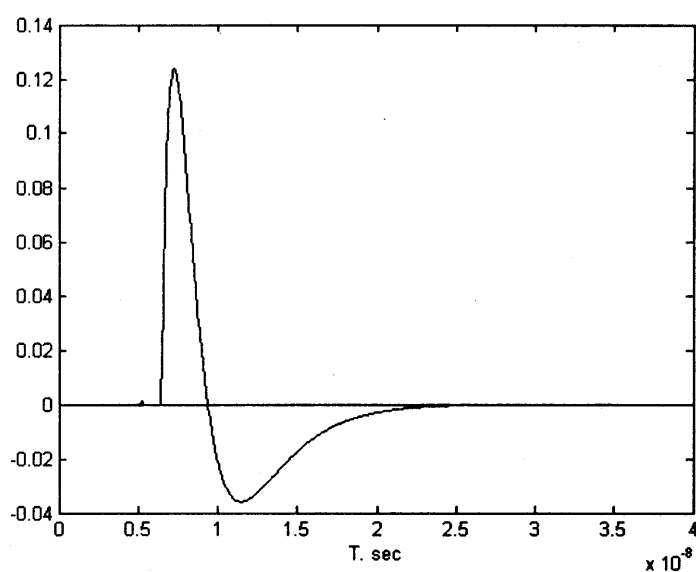


Рис. 3. Неосциллирующий импульс.

Он двухполюсен, площадь под положительной и отрицательной полуволной одинакова, поскольку постоянный ток не излучается антенной. Вторая полуволна асимптотически и монотонно стремится к нулю, не пересекая его. Это идеальный импульс для георадара, который открывает дорогу для создания приборов с реальным потенциалом более 40 дБ.

Такой импульс создает антенна бегущей волны – бесконечно длинный провод. Импульс тока, бегущий по нему, на бесконечности исчезает, полностью излучив энергию. Если провод ограничить по длине, он станет резонансным и будет излучать осциллирующие импульсы. Физика этого явления такова.

Импульс тока, дойдя до конца провода и не потеряв полностью энергию на излучение, отражается и идет в обратном направлении, до второго конца, где он снова отражается и идет в прямом направлении до очередного отражения. Процесс экспоненциально затухает, но, теоретически, продолжается до бесконечности.

Нам удалось разработать прибор с реальным потенциалом в 120 дБ, когда стали использовать в качестве антенн резистивно-нагруженные диполи, или антенны Ву-Кинга.

Ввиду важности теории этих антенн для радиогеолокации, статья “The Cylindrical Antenna with Nonreflecting Resistive Loading” T.T. WU and W.P. KING, IEEE AP-13, May 1965, N. 3, pp. 396 – 373. в моем переводе на русский приведена полностью в Приложении этой книжки.

В этой статье Ву и Кинг выводят закон изменения сопротивления вдоль антенны, когда отражение от ее конца исчезает.

Из теории следует, что если вдоль антенны от центра к концу x_0 сопротивление возрастает по гиперболическому закону

$$R(x) \sim \frac{1}{x_0 - |x|},$$

то импульс тока будет распространяться в ней только в одну сторону, имитируя антенну бегущей волны, но теперь уже в антенне конечных размеров.

Дойдя до конца, импульс полностью диссипирует на искусственной омической нагрузке. Платой за это качество является потеря половины энергии сигнала. Но такой обмен количества на качество был для нас приемлем, поскольку это позволяла мегаваттная мощность нашего искрового передатчика.

Первая проблема, которая возникла перед нами – как технически создать такую пространственную зависимость резистивной нагрузки – ведь в теории описывается непрерывная функция. Прямой способ – нанесение резистивной пленки, но для этого необходимы технология и оборудование.

Решили попробовать заменить непрерывную функцию дискретной, используя в конструкции антенны обычные резисторы. Расстояние между резисторами выбрали достаточно малым, чтобы значение резонанса на участке между сопротивлениями было выше частотного диапазона георадара.

Конструкция антенны приведена на рис. 4.

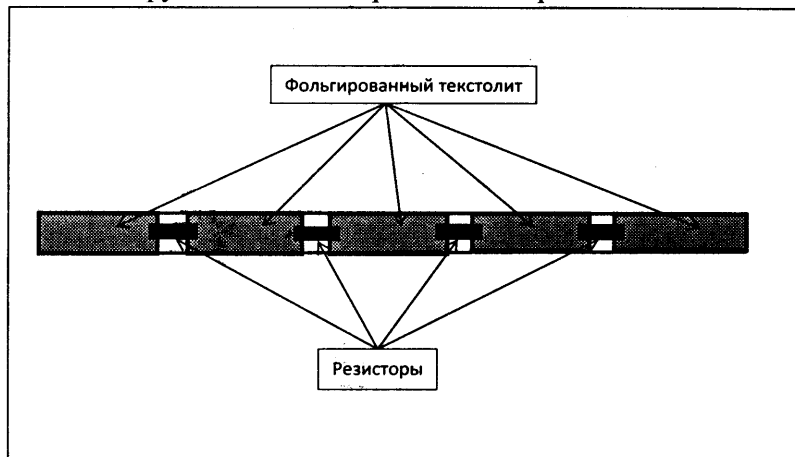


Рис. 4. Конструкция резистивной антенны.

Номиналы резисторов определяются по формуле

$$R_i = \frac{KN}{N+1-i}$$

где i - номер резистора, начиная от центра антенны, N - общее количество резисторов в плече, K - эмпирический коэффициент.

Эксперименты показали, что такая конструкция антенн Ву-Кинга может излучать неосциллирующий импульс, если подобрать коэффициент K для исследуемой среды. Малый коэффициент приводит к тому, что антенна «зазвенит», т.е. зондирующий импульс станет осциллирующим, большой коэффициент вызовет дополнительное затухание сигнала. В среде с большой проводимостью для получения «незвонящего» импульса этот коэффициент меньше, чем в высокоомной среде. Если энергетика прибора достаточна для решения поставленной задачи, то разумнее использовать большой коэффициент, это гарантия хорошего неосциллирующего импульса. Практика показывает, что для подавляющего большинства сред коэффициент K и количество резисторов N меняются в пределах $K = 20 \div 60$, $N = 5 \div 20$. Все наши антенны для наземного зондирования имеют $KN = 200$. Пересматривать это значение пришлось только сейчас, когда мы подняли георадар в воздух.

Для подавляющего большинства специалистов в области георадаров неосциллирующие сигналы совершенно необычны, непривычны и непонятны. Они считают, что импульсы неизбежно осциллируют, и от этого никак нельзя избавиться. Пример осциллирующих («звонящих») импульсов приведен на рис. 13 и 14, а неосциллирующих – на рис. 15.

После доклада ко мне подошел инженер:

- Огромное спасибо! Наконец-то я увидел настоящие сигналы, а не сплошную «тельняшку». Я уже почти смирился, что от «звона» уйти нельзя, физика не позволяет.

В. Золотарев - правопреемник георадарного отделения кафедры радиолокации Рижского института инженеров гражданской авиации (РИИГА). В советское время здесь выпускали георадар «ЗОНД», а сейчас его частная фирма выпускает георадар "ZONDAS".

Впервые увидев записи наших сигналов, он спросил:

- Как это так ловко вы их обрабатываете, какими способами?

Когда мы сказали, что это прямая запись, без обработки, он не поверил:

- Тогда, наверное, вы сигнал детектируете? Я совсем не вижу «звона»!

В его радаре, как и у всех, использована антенна «бабочка».

Антенны авиагеорадара.

По причинам электромагнитной совместимости антенная система георадара должна быть бистатической, т.е. антенны приемника и передатчика должны быть выполнены в виде отдельных устройств и разнесены в пространстве. Этого требует высокая мощность передатчика и большая чувствительность приемника.

Иногда в литературе можно встретить сообщения о моностатических георадарах с одной антенной, но все это приборы с низким энергетическим потенциалом.

Для того, чтобы использовать одну и ту же антенну на прием и передачу в большом динамическом диапазоне и сверхширокой полосе, характерных для нашего мощного георадара, необходимы такие параметры антенного переключателя, которые технически не достижимы.

Антенная система вертолетного георадара показана на рис. 5. В центре V-антенн Ву-Кинга расположены непосредственно связанные с ними передатчик и приемник.

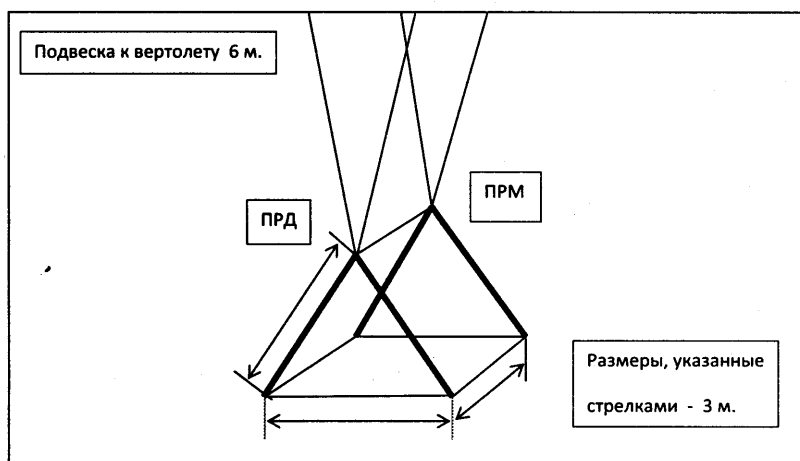


Рис. 5. Антенны георадара вертолетного базирования.

Антенны приемника и передатчика наземного георадара оказывают определенное влияние друг на друга, но наличие близкой среды с высокой (относительно воздуха) диэлектрической проницаемостью и проводимостью это взаимное влияние уменьшает. По крайней мере, в практике наземного георадара у нас не возникало ситуаций, которые можно было бы отнести к переизлучению между антеннами.

Две антенны в воздухе, расположенные на соизмеримом с их габаритами расстоянии, уже не могут рассматриваться как независимые, а должны рассматриваться как система двух антенн. Отметим, что такая антенная система в общем случае формирует разные диаграммы направленности в режиме передачи и приема. Причина в том, что в режиме передачи передающая антенна является активной, а приемная служит пассивным переизлучателем, а в режиме приема все наоборот – приемная становится активной, а передающая пассивной.

Анализ диаграммы направленности связанных антенн для сверхширокополосных импульсных сигналов сложен, достаточно сказать, что в разных направлениях они излучают различные формы импульсов.

По этой причине мы упростим задачу и будем рассматривать диаграмму направленности только для основной гармоники, определяемой размерами антенны, в нашем случае 25 МГц (12 м).

С той же целью упрощения заменим V-антенну обычным диполем, а волну от пассивного переизлучателя будем считать одинаковой амплитуды с исходной, но учтем, что при переизлучении фаза волны изменяется на 180 градусов относительно падающей.

Вектор поляризации антенн расположен перпендикулярно оси вертолета, для того, чтобы уменьшить от него отражение. В продольной плоскости вертолета построим диаграммы приемной и передающей антенн по формуле

$$F(\alpha) = 1 + \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi L}{\lambda} \cos \alpha\right),$$

где λ - длина волны.

Вывод формулы поясняется рис. 6 и 7, диаграммы передающей и приемной антенн приведены на рис. 8 и 9.

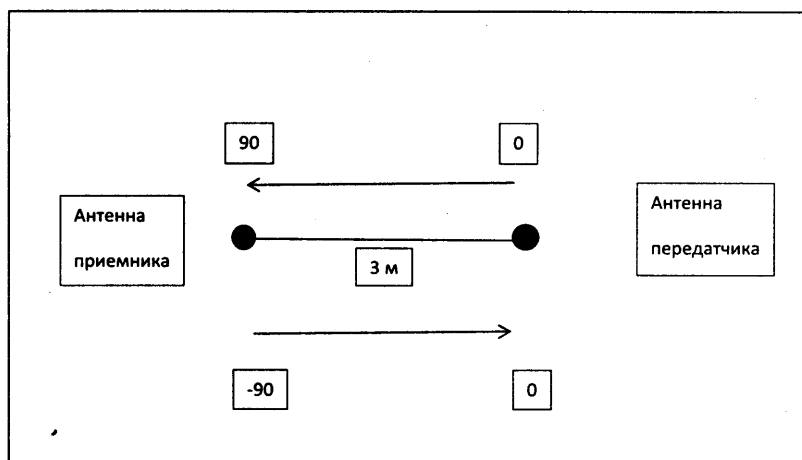


Рис. 6. Баланс фаз между антеннами.

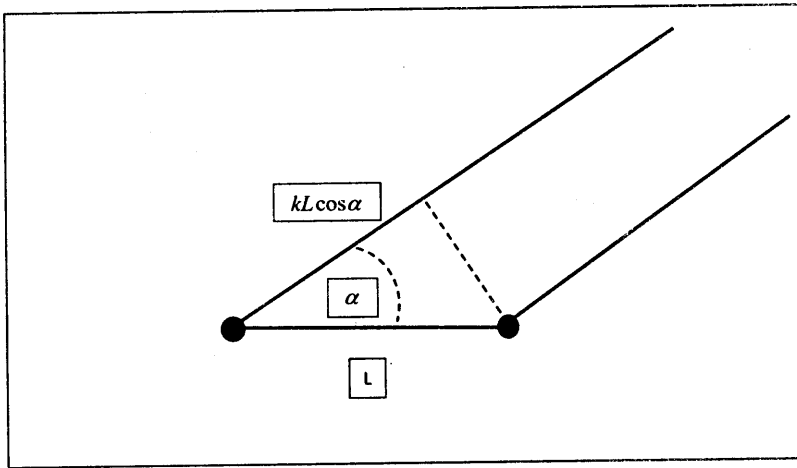


Рис. 7. Расчет поля в дальней зоне.

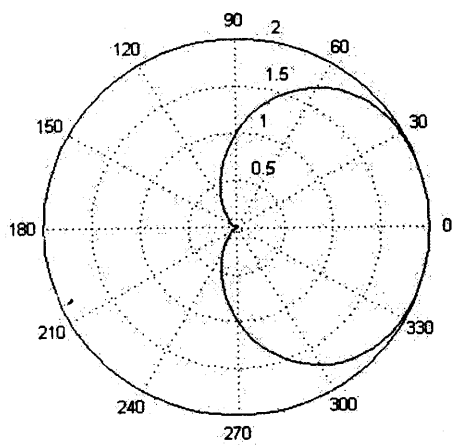


Рис. 8. Диаграмма направленности для основной гармоники передатчика.

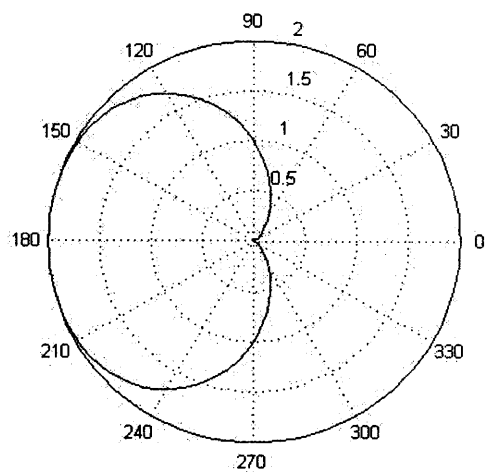


Рис. 9. Диаграмма направленности для основной гармонике приемника.